結合面の不均一接触状態が結合部接触熱抵抗に及ぼす影響*

清水伸二** 野村宗平*** 坂本治久** 矢生晋介**

Influence of Non-uniform Contact Condition on Thermal Contact Resistance of the Joint

Shinji SHIMIZU, Shuhei NOMURA, Haruhisa SAKAMOTO and Shinsuke YAGYU

Previously, a quantitative measurement and an evaluation of the thermal contact resistance of the joint have been examined based on real contact area. These studies have performed under the condition that a real contact area distribution is uniform. However, in many cases, the joints are under non-uniform contact conditions due to the geometric errors of the joint interface.

Then, in this research, the influence of non-uniform contact conditions on the thermal contact resistance is experimentally and analytically examined. As the result, the followings are clarified.

- 1) Concave-convex model with contact length L and non-contact length (pitch $p - L$) can express contact ratio of the joint for the thermal contact resistance analysis.
- 2) The thermal contact resistance is affected by not only the average contact ratio, but also distribution of the real contact area.
- 3) Even if the joint has the same average contact ratio, the thermal contact resistance becomes the smallest in uniform contact distribution, and the larger the local non-uniformity becomes, the larger the resistance becomes.
- 4) The mechanism that non-uniform contact conditions affect the thermal contact resistance of the joint can be explained by the electrical circuit with resistances corresponding to thermal contact resistance and thermal conductivity.

Key words: machine tool, joint, thermal contact resistance, precision, real contact area distribution

1. 緒 言

工作機械は多くの構造要素から構成され、その目的に応じて各種の結合方式により結合されている。これら結合部における静特性、動特性、熱特性、運動特性の4つの特性は、工作機械の精度に大きな影響を与えることがわかっている¹⁾。特に、熱特性は、加工精度に及ぼす要因の40%から70%を占め²⁾、それは、静特性、動特性、運動特性の3特性に比べ非常に大きな影響をもたらすことが指摘されている。

結合部における熱特性、すなわち接触熱抵抗は、工作機械全体の熱変形を予測する上で極めて重要である³⁾。これは、熱負荷によって各構成要素が熱変形するだけでなく、結合部における接触熱抵抗が構造全体の温度場を支配し、そして構造全体の熱変形を決定するからである。しかしながら、多くの場合、結合部の接触熱抵抗の影響を考慮せずに一体形構造として熱変形を予測したり、たとえその影響を考慮していても、実際の結合状態を反映した接触熱抵抗の値を用いずに熱変形を予測している。それらは、設計図面段階で高精度な熱変形解析を行うことが要求されている現状において十分であるとはいえない。

この接触熱抵抗に関する研究は多く行われており、接触熱抵抗は結合面の表面性状や圧力分布といった結合状態に非常に影響を受けることが指摘されている⁴⁾⁵⁾⁶⁾。しかしながら、これらの研究は、結合面積を公称面積であるとして扱っており、接触熱抵抗を定量的に取り扱うことが困難であった。そこで著者ら⁷⁾は、真実接触面積および接触熱抵抗の関係について明らかにし、接触熱抵抗の定量的測定法を確立してきた。その結果、結合部接触熱抵抗は、真実接触面積によって定量的に評価することが

できることが明らかになった。これらの検討は、結合面の平面度が高く、ほぼ均一に接触している状態において行ってきた。しかしながら、実際の結合面はうねりや外荷等の影響により不均一接触状態に置かれる。このような結合状態が工作機械の熱変形特性に及ぼす影響について研究が行われている⁸⁾ものの、真実接触面積の分布状態と接触熱抵抗との関係など、系統的な検討はなされていない。

そこで本研究では、結合状態が結合部接触熱抵抗に及ぼす影響について、実験的および解析的に系統的な検討を行うとともに、そのメカニズムについて考察する。

2. 実験方法およびFEM解析方法

2.1 実験方法

2.1.1 接触熱抵抗の測定方法

測定システムは、温度測定部、加熱部、結合部接触状態測定部、荷重負荷部、および雰囲気制御部によって構成している⁷⁾。結合部は、S45C製の上部試料と下部試料により構成し、その結合面直径は48mmとし、各試料ともに、結合面から10mm、20mm、30mmの3箇所に温度測定用の熱電対を挿入している。また、下部試料には、熱源となるヒータを取付けている。

接触熱抵抗 R $\text{mm}^2 \cdot \text{K/W}$ は、式(1)に示すように、結合要素の巨視的な温度差 ΔT_K を熱流束 q W/mm^2 で割ったもので定義されている。そこで、図1に示すように上部試料および下部試料のそれぞれ3点における測定温度より、接触熱抵抗 R を求める。温度差 ΔT は、測定温度を一次関数で最小二乗近似して結合面での温度 T_S を推定し、上部試料の結合面の温度 T_{SU} と下部試料の結合面の温度 T_{SL} より求める。また、熱流束 q は温度勾配 dT/dx に熱伝導率 λ を乗じて求める。

$$R = \Delta T / q \quad (1)$$

* 原稿受付 平成21年7月7日。

** 正会員 上智大学(東京都千代田区紀尾井町7-1)

*** 上智大学大学院(現、NTN株式会社)

Fig.1 Measurement method of thermal contact resistance of joint

Fig.2 Measurement principle of contact ratio using U.S.

2.1.2 結合面接触状態の測定方法

図2は、超音波を用いた結合部接触状態の測定原理を示している。超音波は、接触部では透過し、非接触部では反射する性質がある。そこで、まず、試料が接触していない状態である無負荷時における反射波高値 he_0 を測定する。次に結合面を形成した後、同一測定箇所からの反射波高値 he を測定する。これらの反射波高値の比 he/he_0 が非接触部の割合であり、接触部の割合である接触率 Er^* は、式(2)に示すように、この値を1から差し引くことにより求めることができることが知られている⁹⁾。なお、結合面全体の接触状態の測定は、専用のXYスキャナを用いて結合面全体を走査することで行う。

$$Er^* = \left(1 - \frac{he}{he_0}\right) \times 100 \quad (2)$$

2.1.3 実験条件

図3は、実験に用いた上部および下部試料の結合面断面形状を示している。図(a), (b)は上部試料と下部試料であるが、両者とも平面度が $0.1\mu\text{m}$ となっている。図(c), (d)は下部試料であり、(c)は平面度 $0.7\mu\text{m}$ の中高形状、(d)は平面度 $0.5\mu\text{m}$ の中高で、かつ偏った形状となっている。ここでは、図3(a)から(d)の試料を試料a, b, c, dと呼ぶことにする。これらのすべての試料には、仕上げ加工として結合面にラップ加工を施している。実験は、上部試料(a)と下部試料(b),(c),(d)の各組合せについて行った。

2.2 FEM解析方法

2.2.1 真実接触面積の分布状態のモデル化

図4(a)は、FEM解析モデルを示している。本解析モデルは、実験で熱電対を設置している範囲を包含してモデル化するとともに、真実接触面積の偏りや接触率の分布を与えるため5つの領域に分けている。図4(b)は、各領域における結合部の詳細図を示している。各領域内において、接触部の数 n は10個とし、領域内では接触面積の分布は均一状態とする。また、接触部凹

(a) Upper specimen: a

(b) Lower specimen: b

(c) Lower specimen: c

(d) Lower specimen: d

Fig.3 Surface profile of four lapped joints

凸の高さは 0.1mm とし、接触面積は接触部凹凸の接触長さ L で設定する。例えば、接触率 Er^* が40%の領域では、領域幅10mmおよび接触部の数が10個であることから、一つの接触部の接触長さ L は 0.4mm となる。

表1は、解析のために与えた5つの領域における真実接触面積の分布パターンを示している。model 1は、接触面積と接触率が均一に分布しているモデルであり、model 2からmodel 5は、不均一な接触モデルである。例えば、model 2では、領域1には接触率が40%の真実接触面積を、領域2および領域3には接触率が5%の真実接触面積を、そして領域4および領域5には接触率が0%の真実接触面積、すなわち非接触部を与えており、中高でかつ偏った接触状態をモデル化している。なお、結合面の平均接触率 Er_m^* は、すべてのmodelにおいて10%としている。

2.2.2 うねりのピッチのモデル化

結合面のうねりは接触部のピッチを用いて表現する。そこで、モデル幅を50mmで一定に保ち、かつ平均接触率 Er_m^* を一定に保つように、接触部凹凸の接触長さ L 、接触部の個数 n およびうねりのピッチ p を変化させる。例えば、ピッチ p を2倍にした場合、接触長さ L は2倍、接触部の個数 n は1/2倍となる。検討では、ピッチ p は、平均接触率 Er_m^* が10%,20%,30%,50%,および80%において、うねり相当のピッチの5mmから25mmまで変化させる。

2.2.3 解析条件および方法

本研究の実験で得られた熱流束 q は、およそ 0.02W/mm^2 である。そこで、実験とほぼ同一条件で解析するために、モデルの上流側を熱流束 $q=0.02\text{W/mm}^2$ で、モデルの下流側を熱流束

Fig.4 FEM analysis model for examination

Table 1 Contact ratio distribution for FEM analysis						
Regions		1	2	3	4	5
Contact ratio Er^* % ($Er^*_m=10\%$)	model 1	10	10	10	10	10
	model 2	40	5	5	0	0
	model 3	0	5	40	5	0
	model 4	5	12.5	15	12.5	5
	model 5	15	7.5	5	7.5	15

$q = -0.02 \text{ W/mm}^2$ で拘束する。また、モデルの側面は真空雰囲気と同等の断熱境界とする。材質は実験試料と同様の鋼(S45C)とし、物性値は、熱伝導率 $\lambda=0.0486 \text{ W/(mmK)}$ 、比熱 $c=490 \text{ J/(kg·K)}$ 、密度 $\rho=7.87 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ とする。

考察は、それぞれの model に対して、定常熱伝導解析を行い、得られた温度分布よりそれぞれの model において、接触熱抵抗 R を式(1)より求めた結果を用いて行う。また、計算に用いる温度は、実験と同様に上流側および下流側のそれぞれにおいて、結合面から $X=10, 20, 30 \text{ mm}$ の位置での節点温度とする。

3. 結果および考察

3.1 実験結果および考察

図5は、図3に示した結合面の組合せにおける結合面接触状態を示している。色の濃淡は、その測定点での接触率 Er^* の大きさを示しており、色が濃くなるほど接触率 Er^* が高いことを示している。この図より、真実接触面積の分布状態は、初期の結合面の形状に依存することが分かる。まず、平面度の高い試料 a と試料 b を結合させた結合面では、低荷重から高荷重まで全面が均等に接触している。次に、試料 a と試料 c を結合させた結合面では、まず中央付近から接触が始まり、荷重の増加に伴い徐々に真実接触面積が増大しているが、その分布は初期の形状に依存して偏りがある。そして、試料 a と試料 d を結合させた結合面でも同様に、荷重の増加に伴い真実接触面積が増大しているが、初期の偏った形状に依存している。そこで、これらの結合状態が接触熱抵抗 R に及ぼす影響を考察する。

図6は、図5に示した結合状態に対応する接触熱抵抗 R と平均接触率 Er^*_m との関係を示している。図中の(□)は試料 a と試料 b を結合させ測定した結果を、(△)は試料 a と試料 c を結合させ測定した結果を、(○)は試料 a と試料 d を結合させ測定した結果を示している。この図より、同じ平均接触率 Er^*_m である場合でも、接触熱抵抗 R は、真実接触面積の分布状態によって

Fig.5 Contact condition of the joints

Fig.6 Relationship between R and Er^*_m

異なっており、また、真実接触面積の分布状態が偏ると、接触熱抵抗 R は大きくなっていることがわかる。例えば、平均接触率 Er^*_m が約 8% における接触熱抵抗 R を比較すると、試料の組合せ a-d(○)では、接触熱抵抗 R は約 $460 \text{ mm}^2 \cdot \text{K/W}$ 、試料の組合せ a-c(△)では、 R は約 $240 \text{ mm}^2 \cdot \text{K/W}$ 、試料の組合せ a-b(□)では、 R は約 $120 \text{ mm}^2 \cdot \text{K/W}$ となっており、接触熱抵抗 R は、真実接触面積が不均一でかつ偏って分布している場合ほど大きく、均一に分布している場合が最も小さくなっている。

そこで、これら以外の結合状態において接触熱抵抗の測定を行い、同様な結果が得られることを確認する。図7は、様々な結合状態で接触熱抵抗 R を測定した結果を示している。図中の○印は均一接触状態での接触熱抵抗 R の測定値を、図中の×印は不均一接触状態での接触熱抵抗 R の測定値を、図中の実線は均一な接触状態の結合面を対象にして Holm の縮流理論¹⁰⁾により求めた式(3)を用いて示した近似曲線である。また、図中の①から⑨までの図は、各測定が行われた時の結合面接触状態を示している。

この図より、①、②、⑥および⑨のように均一接触状態にある場合の接触熱抵抗 R は、Holm の縮流理論の近似曲線上にあ

$$R = \frac{0.318}{Er^*} \left(\arctg \sqrt{\frac{1-Er^*}{Er^*}} - 0.8 \sqrt{Er^*} \sqrt{1-Er^*} \right) \quad (3)$$

Fig.7 Relationship between R and Er^*_m in various contact conditions

Fig.8 Influence of distribution of contact ratio

り、全ての平均接触率 Er^*_m で最も小さくなっている。一方、③、④、⑤、⑦および⑧のように不均一接触状態にある場合の接触熱抵抗 R は、近似曲線より上方にばらついていることがわかる。例えば、③から⑥に示す平均接触率 Er^*_m が 10% 付近における接触熱抵抗 R を比較すると、⑥のように均一接触状態である場合、接触熱抵抗 R はおよそ $50\text{mm}^2\cdot\text{K/W}$ であるのに対し、③から⑤に示すように不均一接触状態である場合、接触熱抵抗 R は $200\text{mm}^2\cdot\text{K/W}$ から $500\text{mm}^2\cdot\text{K/W}$ までと 4 倍から 10 倍ほど均一接触状態時よりも大きくなっている。同様に、⑦から⑨の平均接触率 Er^*_m が 20% 付近においても、不均一接触状態の接触熱抵抗 R は、均一接触時の 4 倍から 6 倍ほど大きくなっている。

これらの結果より、接触熱抵抗 R は、均一接触状態のときが最も小さくなり不均一接触状態になるほど大きくなることがわかる。

3.2 解析結果および考察

3.2.1 真実接触面積の分布の影響

図 8 は、FEM 解析結果より得られたそれぞれの model における接触熱抵抗 R を示している。この図より、それぞれの model において、結合面の平均接触率 Er^*_m は 10% であるにもかかわらず、真実接触面積の分布状態によって接触熱抵抗 R は大きく異なっていることがわかる。例えば、model 4 および model 5 のように真実接触面積の分布の偏りと接触率の差が小さい場合、接触熱抵抗 R は、均一分布状態の model 1 とそれほど変わらない。しかしながら、model 2 および model 3 のように真実接触面積の分布の偏りと接触率の差が大きい場合、接触熱抵抗 R は、均一分布状態の model 1 の約 2.5 倍から約 3 倍大きくなっている。これらは、先程の図 7 に示した様々な結合状態で測定した接触熱抵抗 R の結果と比較すると、接触熱抵抗 R は均一接触状態の時が最も小さく、偏った接触状態になるほど大きくなるといっ

Fig.9 Relationship between thermal contact resistance and waviness

た結果とよく一致している。

3.2.2 うねりのピッチの影響

図 9 は、平均接触率 Er^*_m を 10% から 80% に保った状態でうねりのピッチ p を 5mm から 25mm まで変化させて、結合面のうねりのピッチ p が接触熱抵抗 R に及ぼす影響を検討したものである。図より、うねりのピッチ p は、接触熱抵抗 R に影響を及ぼすことがわかる。例えば、平均接触率 Er^*_m を 10% としたモデルにおいて、ピッチ p が 5mm のときは、接触熱抵抗の値は約 $130\text{mm}^2\cdot\text{K/W}$ であるのに対し、ピッチ p がその 5 倍の 25mm のときは、接触熱抵抗の値は約 $620\text{mm}^2\cdot\text{K/W}$ と約 4.8 倍の大きさになっている。また、その影響の度合いは平均接触率 Er^*_m が低くなるほど大きく、平均接触率 Er^*_m が高くなるほど小さくなっている。

3.2.3 メカニズムの考察

図 10(a) から (d) は、結合部を熱伝導率に相当する内部抵抗と接触部の抵抗から構成される電気抵抗モデルとしてモデル化したものである。図 10(a) は均一に接触している結合部を、(b) は等ピッチで非接触部が存在する結合部を、(c) は真実接触部の分布が左側に偏った結合部を、そして (d) は、等ピッチで非接触部が存在し、かつ接触部の接触率(面の当りの強さ)に分布がある結合部を示している。なお、各モデルの接触部の抵抗は、同じであるとしている。ここで、結合材料の内部抵抗の大きさはすべて等しく、総接触面積はすべて等しいものとする。また、熱量に相当する電流は、モデル上面から入り各抵抗を通過してモデル下面から出るものとする。

まず、ピッチが接触熱抵抗に及ぼす影響を考察する。図 10(a) のように、均一の接触状態であると、接触部の抵抗が x 方向にはバランスしているため、電流は y 方向にのみ流れるものと考えられる。図 10(b) のように真実接触面積が一定の状態でピッチが 2 倍の場合は、接触部の数は半分に、各接触面積は 2 倍に、そして抵抗は半分になるが、総面積は変わらないため、接触部の抵抗は不変である。しかしながら、図 10(a) において抵抗 R_2 、 R_4 、 R_6 に流れていた電流は、図 10(b) ではそれらに隣接する抵抗に流れることになり、接触部付近の結合材料の内部において x 方向の電流が生じる。したがって、接触部の抵抗に加えて、 x 方向の内部抵抗が加わることになり、結合部全体の抵抗が増大することになる。これが、ピッチの増大に伴い結合部の接触熱抵抗が増大するメカニズムと考えられる。

図 10(c) に示すような真実接触部の分布が偏った結合部でもピッチの影響と同様に考えることができる。 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 の総和は、図(a)の接触部の総抵抗値と同じであり、同図で R_5 、 R_6 および R_7 に流れていた電流が R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 に流れ込もうとす

Fig.10 Joint model with thermal contact resistance and internal resistance corresponding to thermal conductivity

るため、新たに内部抵抗が加算されることになり、結合部の総接触熱抵抗としては、増大することになる。

そして、図 10(d)に示すような接触面の当りの強さに分布がある結合部では、電流は面積の広い接触部に多く流れようとする。したがってこの場合も、材料内部において x 方向の電流が生じ、各接触面積の大きさに応じて抵抗 R_1 , R_3 , R_5 , R_7 に電流が配分されるものと思われる。このため、前述したメカニズムにより結合部の総抵抗が大きくなるものと考えられる。

以上のように、結合面に不均一接触状態が存在すると、熱量は材料内部を横切って流れることになり、その部分の内部抵抗により接触熱抵抗が増大するものと考えられる。

4. 結 言

本研究では、結合面の不均一接触状態が結合部接触熱抵抗に及ぼす影響を実験的および解析的に検討し、その特性を明らかにした。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 接触熱抵抗を解析するための結合面の接触率は、接触長さ L と非接触長さ(ピッチ $p - L$)を持つ凹凸モデルにより表現できる。
- (2) 接触熱抵抗は、平均接触率の大きさだけではなく、真実接触面積の分布状態の影響も受ける。
- (3) 同じ平均接触率である場合でも、接触熱抵抗は、均一な接触状態の時が最も小さく、局所的な不均一接触状態なるほ

ど大きくなる。

- (4) 不均一な接触状態が接触熱抵抗に影響を及ぼすメカニズムは、結合部を熱伝導率に相当する内部抵抗と接触熱抵抗に相当する抵抗としてモデル化した電気抵抗回路モデルを用いると、その回路内の結合面に平行方向の内部抵抗に流れる電流の発生により説明できる。

参 考 文 献

- 1) 社団法人 日本工作機械工業会：工作機械の設計学(基礎編) - マザーマシンを知るために、(1998), 86.
- 2) J.B.Bryan : International status of Thermal Error Research, Annals of CIRP, 16 (1968) 203.
- 3) M.H.Atia and L.Kops : Nonlinear Thermoelastic Behavior of Structural Joints-Solution to a Missing Link for Prediction of Thermal Deformation of Machine Tools, Trans. ASME, 101 (1979) 348.
- 4) 柳和久, 塚田忠夫：不規則微小突起をもつ機械加工面の接触伝熱機構(第1報), 精密機械, 47, 2 (1981) 179.
- 5) 佐野川好母：接触熱抵抗, 機誌, 64, 505 (1960) 240.
- 6) 築添正：接触面の伝熱機構, 機論, 17, 12 (1972) 801.
- 7) 清水伸二, 菊森一洋, 坂本治久, 玉置賢次：真実接触面積を考慮した結合部接触熱抵抗の定量的測定法, 精密工学会誌, 71, 8 (2005) 1026.
- 8) M.H.Atia and L.Kops : Importance of Contact Pressure Distribution on Heat Transfer in Structural Joints of Machine tools, Annals of CIRP, 102 (1980) 159.
- 9) 伊東諒：すべり案内面の圧力分布に関する研究, 機論, 34, 257 (1966) 191.
- 10) R.Holm : Electric Contacts, Springer Verlag, New York, N.Y.(1967) 15.